

EL ACUEDUCTO DE TOLEDO

- **El *Toletum* romano**

La ciudad de Toledo, ocupa un emplazamiento privilegiado desde el punto de vista estratégico, casi totalmente rodeada por un barranco tallado por el Tajo. Además, se halla próxima a la feraz huerta del río, por lo que no tiene nada de extraño que los romanos erigieran una ciudad importante en ese emplazamiento.

El principal problema que presentaba entonces era el abastecimiento de agua, pues precisamente esa cualidad de fortaleza natural era el principal inconveniente a la hora de acometer un acueducto que abasteciera la ciudad.

Para ello se proyectó y realizó un complejo sistema de suministro de agua, que constaba de una presa, una canalización y finalmente un puente sobre el Tajo que llevara el agua a la ciudad.

La primera parte de este complejo sistema es la presa de Alcantarilla, ya descrita en el capítulo dedicado a las presas, por lo que no haremos más hincapié en ella.

Para el estudio de la canalización y el puente sobre el río, hay publicados diversos trabajos, algunos quizás demasiado superficiales, sin embargo, D. Fernando Aranda Alonso, ha realizado un estudio muy completo de todo el sistema hidráulico romano de abastecimiento de agua a Toledo, por lo que la mayor parte de los datos los tomaremos de este estudio.

- **El canal**

La canalización propiamente dicha, comienza en la torre de toma de la presa de Alcantarilla, (con una cota de inicial absoluta de 720 m) donde se aprecian los restos de un canal de sección rectangular, de 0,46 m de ancho y 0,38 m de profundidad, todo él de mampostería hormigonada. El revestimiento interior es de *opus signinum* de unos 2 cm de espesor. La unión de la solera con los laterales se ha hecho mediante un redondeo, para evitar los ángulos. La pendiente de esta primera parte del acueducto presenta una media de 1.5 por mil.

(**Aranda Alonso F.** *El sistema hidráulico romano de abastecimiento a Toledo.*)

Lo cual, desde el punto de vista romano está en consonancia con otros acueductos, que generalmente empiezan los trazados con unas pendientes muy pequeñas, para evitar desbordamientos en las partes posteriores de la conducción.

Aproximadamente transcurridos unos 25 Km desde el inicio, el acueducto, debido a la poca altura que ha perdido, necesita aumentar la pendiente del canal, a fin de acometer el cruce del Tajo con la menor cota posible.

Una posible solución para esto es hacer un tramo intermedio de fuerte pendiente, a fin de que el canal alcance la cota deseada.

Esta solución, que sin duda desde el punto de vista conceptual es la más sencilla, plantea no obstante algunas complicaciones. La primera de ellas, es que un aumento de la pendiente acarrea necesariamente un aumento de la velocidad del fluido, y por lo tanto del desgaste de la superficie interna del canal.

La alternativa a esta solución es bastante más compleja, pero desde luego más eficiente. Consiste en hacer un pozo de resalto, semejante en el concepto a los del acueducto de Córdoba, pero con la salvedad de que en este caso hay que realizarlo enteramente sobre el terreno. Este pozo de resalto permitiría, por una parte una disminución del nivel del canal hasta la cota que se requiere, y por otra parte, una regulación efectiva de la cantidad máxima de agua que transcurre a partir de allí por el canal, ya que todo el volumen de agua habría de pasar por un agujero que tendría un diámetro fijado, lo que limitaría la cantidad máxima de agua.

En el acueducto de Toledo, los ingenieros romanos optaron por esta segunda solución, tal vez para facilitar la regulación del caudal del depósito de cabecera del sifón que abastecía la ciudad.

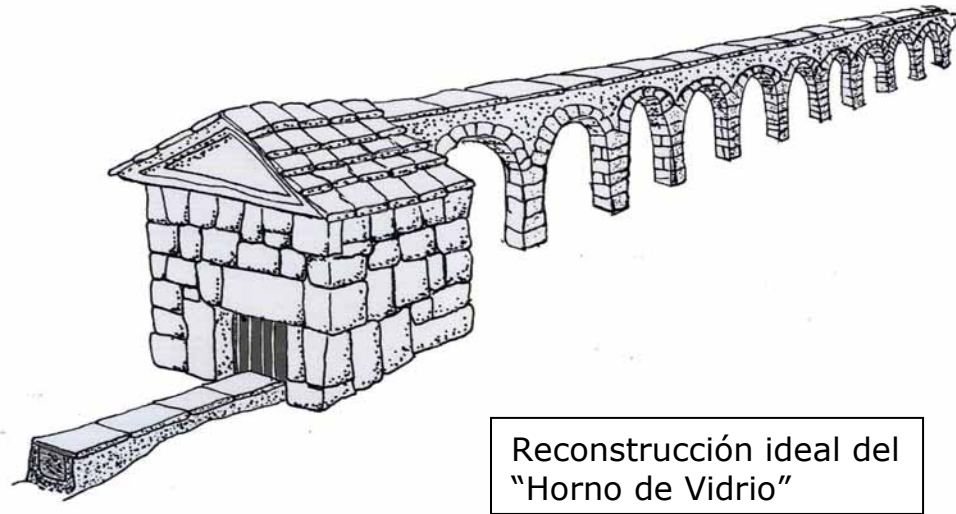
No sabemos cuantos pozos de resalto había en total, porque se han conservado solamente restos de uno, el llamado "Horno del vidrio", por haberse considerado este edificio erróneamente como un horno de vidrio, actualmente en los terrenos de la Academia de Infantería.

Este "horno del vidrio" tiene una planta rectangular de 4.6x3.5 m con una altura de casi 5 m, de sillería en la parte inferior y mampostería hormigonada en la superior.

En la parte superior tiene una arqueta conectada mediante un conducto cilíndrico vertical con otra situada en la parte inferior, de donde partía nuevamente el canal.

El tubo tiene 3,7 m de longitud, 45 cm de diámetro, recubierto en su interior por losas cerámicas semicirculares. (*Aranda Alonso F. Op.Cit.*)

El edificio muestra indicios de que el agua llegaba mediante arcadas al mismo.



Pasado el edificio, las dimensiones de la canal aumentan, como también lo hacen las cuñas de mortero para proteger los ángulos. También aumenta la pendiente, que pasa a un valor de 0,03 llegando hasta el llamado Cerro Cortado, desde donde empezaría el "salto" sobre el Tajo.

- **El caudal.**

Para calcular el caudal en el acueducto de Toledo, lo haremos en el punto donde la pendiente es mínima, que corresponde a la primera de la canalización.

Suponemos:

1. **Caudal máximo**, el correspondiente al calado máximo en esta parte, de pendiente mínima.
2. **Caudal intermedio**, el correspondiente a la mitad del calado máximo.
3. **Caudal óptimo**, el que corresponde a un calado que coincida con la mitad de la anchura del canal.

Los datos de partida son:

- Ancho del canal.....0,46m
- Calado máximo.....0,38m
- Pendiente.....0,015

Acueductos romanos de Hispania

Haremos los cálculos, como ya sabemos, para dos rugosidades de las paredes del *specus*, que se corresponden con unos valores del coeficiente de rugosidad de Manning de $n = 0,017$ y $n = 0,02$

		m ³ /s	Litros/s	m ³ /día	Quinarias
0,017	Q max.	0,11	109,0	9.421	235,53
	Q inter.	0,03	29,51	2.549	63,73
	Q ópt.	0,04	39,48	3.410	85,25
0,02	Q max	0,09	92,69	8.008	200,2
	Q inter.	0,03	25,09	2.167	54,18
	Q ópt.	0,03	33,56	2.899	72,48

Vemos pues que el máximo caudal que podría entrar en Toledo sería de algo más de 100 litros por segundo, y el mínimo, de unos escasos 25 litros.

Es de suponer, que la arqueta de cabecera del sifón, tuviese un elemento de regulación, de manera que el sifón siempre estuviera en carga, limitando de este modo el caudal que accediera a la ciudad. ¿Cuál sería esta cantidad? No hay manera de saberlo, aunque bien pudiera ser, que al proceder el agua de una presa (que se supone llena), el caudal que llevaría el *specus* fuese siempre el máximo posible, o muy cerca de él, pudiendo la arqueta de cabecera hacer una fijación del caudal de acceso al sifón de valores muy próximos al máximo.

Aranda Alonso, hace un redondeo a 100 litros por segundo para el acueducto. Personalmente, dado el carácter conservador de los ingenieros romanos, y los amplios márgenes de seguridad que manejaban, me inclino más a pensar que la arqueta de cabecera del sifón regularía el caudal a unos 81 litros por segundo, que se corresponderían con 176 quinarias (exactamente serían 80,96 litros por segundo), que son las tres cuartas partes del caudal máximo.

El “Horno de vidrio” no supondría una limitación al caudal del acueducto, pues el conducto de unión de las dos cubetas está totalmente sobredimensionado, ya que con un diámetro de 45 cm, y una longitud de 3,7m. Podemos, muy fácilmente hallar el caudal máximo que pasaría por él

La velocidad máxima que tendría el agua al llegar a la cubeta inferior sería de:

$$v = \sqrt{2gh}$$

Siendo el valor de “h” el de la altura, o sea 3,7m.

La expresión del caudal sería por tanto:

$$Q = V \cdot A = \left(\frac{0,45}{2}\right)^2 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 3,7} = 1,36 \frac{m^3}{s}$$

Que vemos, está muy por encima del caudal máximo que podría aportar el acueducto en cualquier caso.

El sobredimensionado de este conducto, bien pudo ser debido a un deseo de que en ningún caso supusiera una limitación al caudal, antes de la arqueta de cabecera del sifón, pues es precisamente aquí donde debe hacerse la limitación del caudal del sifón para que no entre aire en el mismo.

- **El sifón.**

Para Cruzar el río, únicamente habría dos posibilidades, el puente o el sifón invertido.

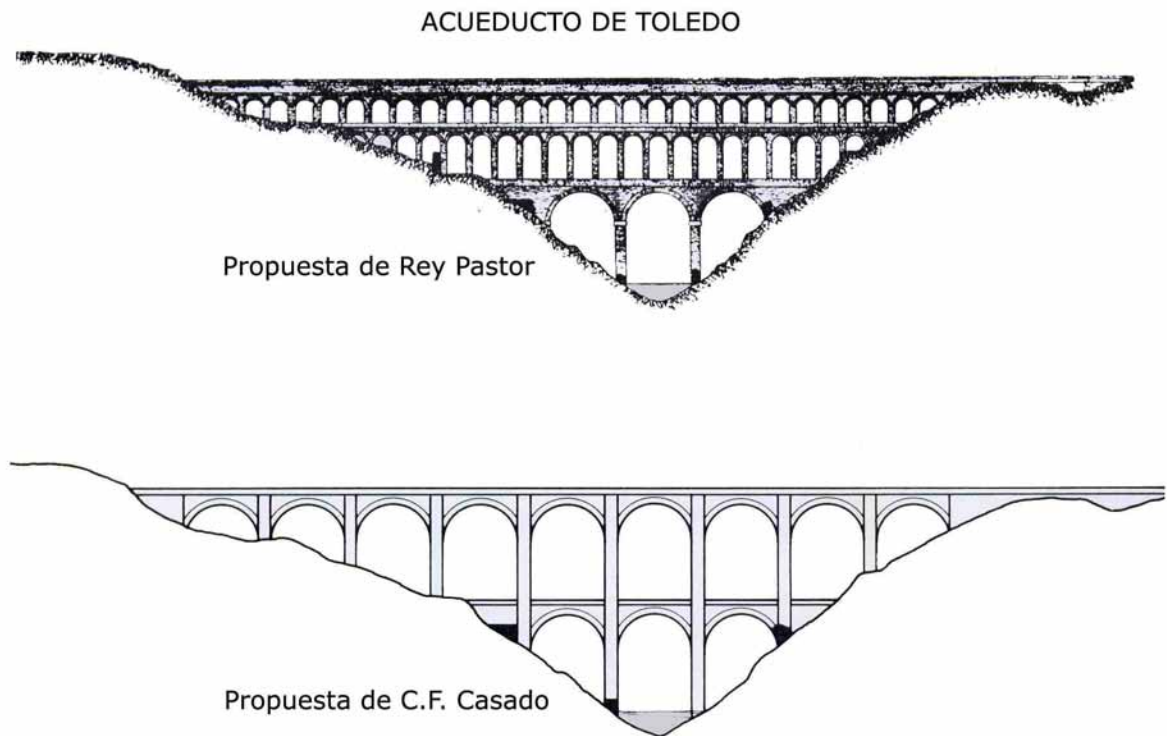
El puente presenta unas dificultades extraordinarias, habida cuenta de la altura a salvar

Del sifón no sabemos casi nada. Apenas quedan indicios, es mas, durante mucho tiempo, no ha estado claro el hecho de si había o no un sifón para el abastecimiento a Toledo.

De hecho, Carlos Fernández Casado, cuando se refiere a Toledo, ni siquiera menciona la posibilidad de que el acueducto de abastecimiento, cruzara el Tajo por un sifón, antes bien, se limita a rebatir parcialmente la tesis de Alfonso Rey Pastor, que en su día hizo una reconstrucción teórica del acueducto romano, para la Academia de Bellas Artes y Ciencias Históricas de Toledo.

Acueductos romanos de Hispania

C. Fernández Casado, modifica en parte el diseño propuesto por Rey Pastor, basándose en el hecho (por él observado) de que casi todos los acueductos romanos españoles presentan el característico cuadrado-semicírculo en sus arcadas. (**Fernández Casado. C. Acueductos romanos en España**).



Otros autores, como D. Julio Porres Martín Cleto, dan por supuesto que el abastecimiento se hacía por un puente-acueducto

Las magnitudes de este puente-acueducto deberían ser descomunales, (más de 300 m de largo y más de 70 m de alto) habida cuenta de la profundidad del barranco, hasta tal punto, que, sería sin duda el más elevado y grandioso que los romanos habrían levantado jamás, salvo que la altura del mismo fuese tan escasa que no abasteciera a la parte superior de la ciudad. De hecho, Fernández Casado, considera que la llamada "Cueva de Hércules" representa el *Castellum aquae* de la ciudad, pese al inconveniente de no estar a la cota más alta de la misma.

Una obra de esta envergadura, seguramente no hubiera pasado desapercibida en la antigüedad, por lo que sería muy probable que si no nos hubiera llegado íntegra en su construcción, al menos su descripción si habría sido recogida por diversos autores clásicos.

La solución más sencilla sería un sifón, que podría llevar el agua, incluso hasta las zonas más altas, junto al actual Alcázar, que sin duda tendría una cota algo menor.

Desde el Cerro Cortado, el agua podría llegar a Toledo desde una cota entre 545 y 550 m.

Por desgracia, Apenas queda nada apreciable de todo el conjunto de la obra, apenas cuatro frogones.

Las tuberías, sin duda de plomo, fueron rapiñadas hace tiempo, e igualmente casi todo el resto de la obra.

No obstante, F. Aranda sugiere que la altura del puente sobre el que descansaría el *venter* del acueducto tendría una altura de 40 metros. Asimismo, sugiere que las tuberías serían de unos 250 mm De diámetro, basándose en las halladas en los sifones de Lyon, montándose varias de ellas en paralelo, a fin de evitar sobrecargas en las mismas y facilitar las operaciones de limpieza y reparación, aunque en la realidad, no hay nada hoy en día que nos indique esta circunstancia.

F. Aranda, basándose en los escasos restos actuales, propone un descenso de las tuberías oblicuo para compensar la fuerte pendiente de los márgenes, cercana al 100%. La bajada, sería de unos 200m. Hasta el *venter*, pues el autor supone que las tuberías irían por una especie de canal tallado en roca, actualmente existente, que baja hacia el río desde el Cerro Cortado. Lógicamente, al rapiñar el plomo de las tuberías, se excavaría lo necesario para quitarlo de los anclajes. Lo que llevaría a formar un canal, por el lugar por donde bajaban las tuberías.

Por la parte de la ciudad, no queda ningún rastro, por lo que es totalmente imposible encontrar el lugar adonde estaba el *Castellum aquae*, aunque se supone que estaría en los terrenos del actual Alcázar, que sin duda se encontraría a una cota inferior a la actual, pues a través de los siglos, la cantidad de restos que se han ido acumulando en ese lugar, es enorme.

En realidad, no tenemos ningún elemento ni indicio que pueda rebatir lo propuesto por F. Aranda, por lo que consideraremos estos supuestos.

En cuanto a las tuberías que llevarían el agua a la ciudad, se nos plantea alguna dificultad. No tenemos ningún resto que nos permita suponer qué tipo de canalización llevaban, (dando por sentado que serían de plomo, por la gran presión que deberían soportar en el *venter* sobre el río).

Acueductos romanos de Hispania

Para realizar el cálculo de dicha tubería, partimos de lo siguiente:

- Cota del depósito de cabecera.....552 m
- Cota del depósito receptor.....545 m
- Longitud del sifón.....2.000 m
- Número de codos del sifón.....3, de 45° (aprox.)
- Caudal (de diseño).....81 litros/s

Con estos datos, el procedimiento iterativo para hallar el diámetro es el siguiente:

Suponemos una velocidad, que con la fórmula de Darcy nos dará un valor del diámetro, y por lo tanto del área, por lo que con la fórmula general del Gasto, podemos hallar una nueva velocidad, que al introducirla de nuevo en la ecuación de Darcy, nos volverá a dar un nuevo valor más ajustado del diámetro, y así sucesivamente, hasta hallar un valor del mismo que no nos produzca variación.

Con una velocidad de partida de 1 m/s, y después de dos iteraciones, obtenemos lo siguiente:

- Velocidad del agua en la tubería.....1,18 m/s
- Diámetro de la tubería.....0,297 m

Si tenemos en cuenta que 1 pie romano eran 0,296 metros, nos encontramos con que el diámetro de la tubería coincide casi exactamente con esta medida.

No es pues demasiado arriesgado suponer que los *plumbarii* romanos enrollaran las planchas de plomo alrededor de cilindros de 1 pie de diámetro para conformar la tubería del sifón.

Llegados a este punto se nos plantean varios interrogantes:

1. ¿Qué espesor de chapa tenían estas tuberías?
2. ¿Había una única tubería, o estaba el sistema conformado por varias en paralelo?

En realidad, a la primera cuestión no podemos responder a ciencia cierta, únicamente podemos averiguar que espesor podían tener. Todo lo demás son meras especulaciones.

Acueductos romanos de Hispania

Antes de calcular el espesor, debemos averiguar cual es la fuerza que debe resistir una tubería sometida a presión.

Previamente, haremos, para simplificar los cálculos algunas suposiciones:

- a.- La presión interior (p_i) es considerablemente mayor que la presión exterior (p_e)
- b.- El espesor de la chapa es considerablemente más pequeño que el radio interior.

Si entonces nos planteamos las ecuaciones de equilibrio, para lo que podemos considerar como media tubería, tenemos:

$$2F + p_e \cdot 2R_e - p_i \cdot 2R_i = 0$$

Siendo:

F = Fuerza ejercida por la media tubería adyacente para mantener el equilibrio.

R_i = Radio interior de la tubería.

R_e = Radio exterior de la tubería.

Si en la ecuación anterior despejamos el valor de la fuerza F, tenemos:

$$F = P_i \cdot R_i - P_e \cdot R_e$$

Pero al ser la presión exterior despreciable frente a la interior, y los dos radios del mismo orden de magnitud, tenemos que:

$$F \approx P_i \cdot R_i$$

Evidentemente, cometemos un error al hacer esta suposición, pero es de una magnitud lo suficientemente pequeña como para que podamos aceptarlo.

Ahora podemos calcular el esfuerzo a que se veían sometidas las tuberías de plomo del sifón.

Si consideramos válida la hipótesis de que el *venter* del sifón estaba 200 m por debajo de la arqueta de cabecera, resulta que las tuberías tenían en su interior una presión de 200 m.c.a (Metros de columna de agua). Si tenemos en cuenta que un m.c.a. son 0,1 Kg/cm² resulta finalmente una presión interior de 20 Kg/cm²

Por otra parte, consideraremos el esfuerzo de rotura del plomo.

Este esfuerzo, depende de la composición y aleaciones del metal, de los tratamientos mecánicos previos que haya podido tener (El plomo laminado es más resistente que el simple plomo colado, etc.

En nuestro caso, consideraremos un valor de 120 Kg/cm². En realidad, el esfuerzo de rotura del plomo puro es algo mayor.

Si llamamos "h" al espesor de la tubería, tenemos que el esfuerzo (E) de tracción a que está sometida la chapa es:

$$E = \frac{F}{h} = \frac{P_i \cdot R_i}{h}$$

En el momento límite, igualamos el esfuerzo de rotura al que soporta la tubería, teniendo:

$$120 = \frac{20 \cdot R_i}{h}$$

De donde podemos sacar la relación:

$$R_i = 6h$$

Es decir, cuando el espesor de la chapa es igual a 1/6 del radio interior de la tubería con una presión interna de 200 m.c.a. el plomo alcanza el esfuerzo de rotura, luego con un espesor superior, la tubería aguantará la presión.

Hay aquí un dato que es de suma importancia: El espesor depende directamente del radio interior, es decir, que a un mayor radio, un mayor espesor será requerido, y viceversa.

Si suponemos un diámetro de 1 pie romano para el diámetro de la tubería, tenemos:

$$h = \frac{R_i}{6} = \frac{0,148}{6} = 0,025m.$$

Esto supone un espesor de 2,5 cm.

Realmente es un espesor notable, si tenemos en cuenta que no manejamos apenas ningún margen de seguridad, por lo que para funcionar con ciertas garantías, habría de tener la tubería un espesor de 3 centímetros al menos. Muy bien pudiera ser de 3,6 cm. el equivalente a dos dedos romanos.

¿Cuál era el margen de seguridad que manejaban los ingenieros de Roma? Ciertamente no lo sabemos. Se guiaban por la experiencia acumulada, haciendo los cálculos a ojo y mediante tanteos. Sin embargo, y precisamente por ello, su forma de ajustar las dimensiones, podría ser que las medidas de la tubería del sifón de Toledo, no divergieran demasiado de las calculadas.

La segunda cuestión que nos planteábamos, es la de si habría más de una tubería en el sifón.

El hecho de que no quede ni rastro de las mismas, tiene la ventaja de que nos permite elucubrar y hacer suposiciones libremente.

En principio, por ejemplo varias tuberías en paralelo, presentan la ventaja de que en el caso de que una de ellas esté en un proceso de reparación, el servicio puede no interrumpirse necesariamente, (caso que ocurre indefectiblemente si sólo hay una)

Ahora bien. Partiendo de la base de que los ingenieros romanos elegirían siempre la solución más económica, ¿se necesita más plomo para hacer una sola tubería de un área de paso determinada, o dos, por ejemplo, de manera que la suma de las superficies de paso sea la misma que el caso de la tubería única?

Veamos cual es la relación entre los radios de, por ejemplo dos tuberías equivalentes a otra mayor.

Supondremos que la tubería grande tiene de radio una cantidad "R" y las pequeñas un radio "r"

Si igualamos las áreas de los círculos respectivos tenemos:

$$\pi R^2 = \pi r^2 + \pi r^2$$

Simplificando:

$$R^2 = 2 \cdot r^2$$

$$R = r \cdot \sqrt{2}$$

$$r = R \frac{\sqrt{2}}{2}$$

Acueductos romanos de Hispania

Ahora vamos a comparar las necesidades de plomo para confeccionar una tubería, de una sola o de dos canalizaciones.

Si tenemos una sola tubería, para una unidad de longitud necesitaremos:

$$V_1 = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot H \cdot 1$$

Siendo "H" es espesor de la tubería.

Si ponemos el espesor en función del radio, como hemos visto:

$$V_1 = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{R}{6} = \frac{\pi R^2}{3}$$

Si ahora tomamos las dos tuberías equivalentes tendremos:

$$V_2 = 2(2 \cdot \pi \cdot r \cdot h) \cdot 1 = 4 \cdot \pi \cdot r \cdot h$$

Sustituimos el espesor en función del radio, como hicimos antes:

$$V_2 = 4 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{r}{6} = \frac{2 \pi r^2}{3}$$

Si ahora ponemos el radio de la tubería pequeña en función de la grande, tenemos:

$$V_2 = \frac{2 \pi}{3} \cdot \left(R \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \right)^2 = \frac{2 \pi}{3} \cdot \frac{R^2}{2} = \frac{\pi R^2}{3}$$

Vemos que si comparamos V_1 con V_2 , tenemos una igualdad, por lo tanto, debido a que el espesor requerido de las paredes de la tubería disminuye a medida que lo hace el diámetro de la misma, la cantidad de plomo necesario para fabricar dos tuberías de plomo es la misma que la que se necesita para fabricar una sola que pueda transportar el mismo caudal con las mismas garantías de seguridad.

Es inevitable que nos planteemos entonces la pregunta:

¿Conocían esto los romanos?

No tenemos evidencias, pues como ya hemos observado, resolvían los problemas que se les iban planteando a medida que les iban surgiendo.

Por una parte, tenemos el caso de los sifones de Lyon, en donde colocaron varias tuberías en paralelo. Sin duda una de las causas era la posibilidad de poder hacer reparaciones (que debían ser muy frecuentes) sin necesidad de interrumpir completamente el servicio.

Sin embargo, tenemos también el caso de Zaragoza, donde parece que optaron claramente por la solución de poner una única tubería de un gran diámetro, desechando la "solución múltiple", lo que parece indicar que desconocían el hecho anteriormente calculado, pues, efectivamente dos tuberías con el mismo espesor de chapa que una sola de diámetro equivalente, necesitan casi tres veces más material para ser conformadas (exactamente 2,83 veces)

El hecho de que en Zaragoza, la tubería, pese a tener un diámetro muy grande tuviese un espesor más pequeño que la de Toledo, no es una contradicción necesariamente, porque como hemos visto, el espesor también depende de la presión interior que tuviese la tubería. Hay que suponer que en Zaragoza, la presión interior era sensiblemente más pequeña que la alcanzada en Toledo.

También es significativo el que en el caso de Toledo, que nos ocupa, el diámetro de la "tubería única" que hemos calculado sea precisamente de un pie romano, lo que podría indicar que este era el diámetro elegido para la tubería que abastecería la ciudad.

- **La población**

En este punto nos encontramos con la dificultad para calcular con exactitud, cual era la cantidad de agua que recibían en Toledo por persona, y su distribución.

Hasta nosotros no han llegado restos apreciables de grandes construcciones romanas (lo que por desgracia no significa que no las haya habido). Sin embargo, debemos suponer, por su ausencia, que la ciudad de Toledo, tenía un carácter eminentemente agrícola y militar, comparable a Segovia o Ávila, lejos del carácter comercial o político de *Segóbriga* o *Clunia* (por citar ciudades del interior).

No obstante, para realizar los cálculos de la población de Toledo, supondremos que los porcentajes de consumo y reparto del agua fuesen parecidos a los de Roma, pues era una constante romana, el “trasplantar” el modo de vida romano allí donde se asentaban.

De las 176 quinarias que hemos supuesto entraban en Toledo, tendremos pues que las destinadas como agua de boca serían en una proporción análoga a Roma, un 14,77% del total, es decir 26. Esto supone 1.040 m³/día.

Si el consumo de agua por habitante fuese similar al de Roma, (60 litros por día) tendríamos un total de 17.333 habitantes.

Si suponemos el mismo porcentaje de patricios que en Pompeya, resultaría un total de habitantes para Toledo de 17.623 habitantes, lo que está en consonancia con los 20.000 que proponen Rey Pastor y Porres Martín-Cleto (**Porres Martín-Cleto. J.** *El abastecimiento romano de aguas a Toledo*)